

VLIV AI A Ti NA STRUKTURU A KVALITU ODLITKŮ Z LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM

INFLUENCE OF AI AND Ti ON MICROSTRUCTURE AND QUALITY OF COMPACTED GRAPHITE IRON CASTINGS

T. ELBEL¹, J. HAMPL²

ABSTRAKT:

The contribution is aimed at study of influence of chemical composition of compacted graphite cast iron (CGI, GJV) on microstructure and surface quality of castings, particularly on the occurrence of pinholes. It has been found out that aluminium and titanium in CGI (GJV) effect the formation of this defect in castings. Aluminium content in the range of 0.02 up to 0.1 % is critical. Increased occurrence of pinholes was also determined with Ti contents above 0.1%. On the same set of experimental castings it has been found out that increased contents of those elements on the other hand support the crystallization of compacted graphite. But the utilization of that method for control of CGI (GJV) microstructure is limited with a possibility of formation of surface defects in castings – pinholes, but also coldshuts and shrinkage cavities.

ABSTRAKT:

Příspěvek je zaměřen na studium vlivu chemického složení litiny s červíkovitým grafitem (GJV) na mikrostrukturu a povrchovou kvalitu odlitků, zejména výskyt bodlin. Bylo zjištěno, že hliník a titan v GJV působí na vznik této vady na odlitcích. Kritický je obsah hliníku v rozmezí 0,02 až 0,1 %. Zvýšený výskyt bodlin byl také zjištěn při obsazích Ti nad 0,1%. Na stejném souboru experimentálních odlitků bylo zjištěno, že zvýšené obsahy těchto prvků na druhé straně podporují krystalizaci červíkovitého grafitu. Využití této možnosti pro řízení mikrostruktury GJV je však omezeno možností vzniku povrchových vad – bodlin, ale také zavalenin a staženin.

KEY WORDS: cast iron crystallization, pinholes, compacted graphite

KLÍČOVÁ SLOVA: krystalizace litiny, bodliny, červíkovitý grafit

ÚVOD

Litina s červíkovitým grafitem je materiálem, který se opět dostává do popředí zájmu konstruktérů a sléváren, které si osvojují nebo zdokonalují výrobu odlitků z tohoto materiálu. Z mnoha publikací citujme 3 z uplynulého roku [1,2,3]. Podle americké normy ISO 16 112 se pro tento materiál používá název „litina s kompaktním (vermikulárním) grafitem“ (zkratka GJV, která se bude používat v dalším textu). Odborná literatura v evropských zemích často používá termín vermikulární grafit. V tomto příspěvku je dáována přednost českému názvu červíkovitý grafit. V minulých letech jsme se zabývali studiem povrchových vad – bodlin na odlitcích z litiny s červíkovitým grafitem a zejména vlivem chemického složení litiny na jejich vznik [4,5]. Prvky, které působí na vznik bodlin tj. Al, Ti, Mg a S mají rozhodující význam pro krystalizaci červíkovitého grafitu i na jeho podíl ve struktuře odlitku. Této problematice bude věnován předložený příspěvek, v jehož úvodu budou připomenuty hlavní závěry o mechanismu vzniku bodlin na odlitcích.

¹ Prof. Ing., Tomáš Elbel CSc. – Katedra slévárenství, FMMI, VŠB-TU Ostrava

² Ing. Jiří Hampl, Ph.D. – Katedra slévárenství, FMMI, VŠB-TU Ostrava

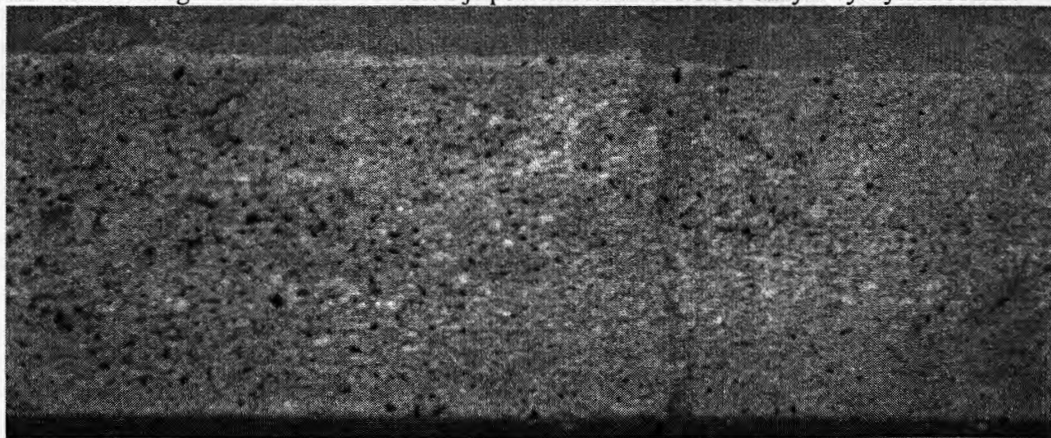
1 VZNIK BODLIN

Experimenty byly prováděny na laboratorních odlitcích tyčí s dlouhou trajektorií proudění kovu odléváných do forem ze syrové bentonitové směsi. Byl využit srovnávací experiment, při kterém se za jinak stejných podmínek (stejně složení vsázky, očkovač, modifikátor, stejná teplota lití) měnila vlhkost formovací směsi, obsah Al a Ti v kovu a způsob plnění formy.

Ke zkoumání byl použit odlitek stupňovité tyče o hmotnosti 21 kg, o délce 1200 mm, šířce 40 mm a tloušťkách 40, 30 a 20 mm. Formy byly zhotovovány ze syrové bentonitové směsi. Pojivem byl natrifkovaný bentonit. Směs neobsahovala uhlíkatou přísadu, pro zvýšení plasticity byl do ní přidán dextrin v množství 0,75 hm. d. Použitý křemenný písek má střední zrnitost $d_{50} = 0,27$ mm. Směsi se lišily obsahem vody. Kov pro zkušební odlitky se tavil na elektrické středofrekvenční peci o objemu 40 nebo 100 kg. Odlévání se provádělo z ruční pánve. Očkování (FeSi 75) probíhalo v odlévací pánvi a modifikace na CGI se prováděla v pánvi polévacím způsobem, anebo metodou in-mould pomocí modifikátoru Bjomet 3. Množství modifikátoru bylo při modifikaci v pánvi 1 % a ve formě 0,6 %.

2 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Provedené experimenty potvrdily některé literární poznatky o vlivu Al na vznik bodlin u litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem a ověřil se i vliv Ti. Bylo potvrzeno, že u litiny s červíkovitým grafitem, při obsahu Al nad 200 ppm existuje silná pravděpodobnost vzniku bodlin a to prakticky bez ohledu na vlhkost formovací směsi. Byl však nalezen velký rozdíl mezi množstvím bodlin při modifikaci litiny ve formě a v pánvi. Více bodlin vznikalo při modifikaci v pánvi, při které se používalo větší množství modifikátoru a vznikalo i více reakčních zplodin. To se projevilo i na různém vzhledu bodlin při zkoumání na SEM. Z morfologie vady jsme zjistili, že se jedná o exogenní mechanismus tzv. vodíkové bodliny. I tak malé množství hliníku kolem 200 ppm rozkládá vodní páru z formy, což zvyšuje obsah vodíku v tekutém kovu. Kromě Al byl v některých tavnách zvýšený obsah Ti, kterým se ověřovaly výsledky Katze [6], podle kterého Ti v množství větším než 300 ppm brání vzniku endogenních bublin. Na obr. 1 je povrch odlitku z CGI se silným výskytem bodlin.



Obr. 1 – Bodliny na povrchu zkušební tyče z GJV

Byly zjištěny následující regresní rovnice mezi počtem bodlin na cm^2 a obsahem hliníku a vlhkosti:

Pro soubor taveb s modifikací litiny v pánvi:

$$NP = -5,97 + 0,81522 \cdot (Al)^{1/2} \quad (1)$$

ve které: NP – počet bodlin na cm^2 , Al – obsah hliníku [ppm]. Platí od 60 do 600 ppm Al.

Pro modifikaci litiny ve formě (in mould):

$$NP = -0.606 + 0,23 W + 0.0191 \cdot (Al)^{1/2} \quad (2)$$

ve které NP – počet bodlin na cm^2 , Al – obsah hliníku [ppm]; W – vlhkost formovací směsi [%]. Platí od 60 do 2500 ppm Al a 2 až 4,5 % vlhkosti.

Při obsazích 1500 až 2000 ppm lze výskyt bodlin potlačit, protože se na rozhraní forma-kov vytváří silná souvislá vrstva oxidů Al. U odlitků s obsahem Al kolem 2000 ppm byl na horní ploše odlitků skutečně pozorován zvrásněný povrch oxidických blan a byl zde také zjištěn vyšší obsah Al než ve středu odlitku nebo na spodní ploše [5]. Povrch těchto odlitků je zvrásněný se zavaleninami a toto řešení k potlačení bodlin je v praxi nepoužitelné. Kromě Al byl v některých tavných kotelích zvýšen obsah Ti nad hranici uváděnou Katzem [6], tj 300 ppm, která může eliminovat působení vyššího obsahu Al. U souboru těchto taveb byl Ti ve většině případů pouze v desítkách ppm. Výjimkou byly 3 tavné kotle, u kterých byl obsah Ti vysoký 0,475; 0,635; 0,58 %. U taveb s 0,475 a 0,635 % Ti byl výskyt bodlin řádově vyšší, než u ostatních taveb.

Zvýšení obsahu Ti nevedlo k potlačení vzniku bodlin, ale spíše se jednalo o opačný vliv. U ocelových odlitků zkušenosti ukazují, že tavné kotle s přísadou Ti jsou náchylné k reoxidaci a v této souvislosti by mohl Ti při vyšším obsahu i v litinách podpořit vznik bodlin. Závěrem můžeme tedy konstatovat, že Al a Ti jako prvky s vysokou aktivitou ke kyslíku podporují vznik vodíkových bodlin na odlitcích z GJV.

3 VLIV AL A Ti NA MORFOLOGII GRAFITU

Při výše uvedených experimentech byla také posuzována struktura odlitků, zejména tvar grafitu. Ve zkoumaných odlitcích bylo dosaženo ve struktuře 80 až 100 % červíkovitého grafitu s výskytem ojedinělých zrn v množství 0 až 20 %. S ohledem na přítomnost Al a Ti ve vzorcích byl proveden podrobnější rozbor jejich působení na morfologii grafitu. V tomto směru byli autoři inspirováni prací Hrusovského a Wallace [7].

Pro porozumění experimentů a jejich interpretaci je nutno ještě rozebrat podmínky krystalizace červíkovitého grafitu, protože je jedním z přechodových druhů grafitu mezi pravidelnými lupínky grafitu typu A, které vznikají při velmi nízkém podchlazení a zrnitým grafitem tvárné litiny. Litina s kuličkovým grafitem se vyrábí odstraněním S a O_2 z taveniny po přidání modifikačních prvků (Mg, KVZ). Popis nukleace a růst červíkovitého grafitu vychází z mechanismu růstu zrnitého grafitu. V odborné literatuře [7 až 9] převládá názor, že zrnitý grafit roste přímo z taveniny na zárodku v austenitové obálce, která jej následně uzavře. Pokračováním růstu částice grafitu při částečném kontaktu s taveninou se vytváří červíkovitý grafit. Jednotlivé větve červíkovitého grafitu vyrůstají z deformovaného zrnitého grafitu. Červíkovitý grafit roste v kontaktu s taveninou v mezerách austenitových obálek grafitu. Důležitou fází celého procesu je rovněž segregace některých přísadových prvků. Po obklopení zrnitého grafitu obálkami austenitu pokračuje odměšování přísadových prvků, které se odměšují buď do zbývající taveniny (Mn, Cr, Ti) nebo se koncentrují v obálkách austenitu (Si, Ni). Touto cestou se mohou v tavenině koncentrovat i příměsi působící proti tvorbě zrnitého grafitu (např. Ti, Al, Sn, Pb, Bi, Zr a další) a podporují vznik červíkovitého (vermikulárního, kompaktního) grafitu.

4 POPIS VLASTNÍCH EXPERIMENTŮ

Na pokusných odlitcích tyčí s odstupňovaným průřezem, použitých současně pro studium bodlin, byl studován vliv Mg, S, Ti a Al v litině. Při experimentálních tavných kotelích litiny GJV bylo odlito 25 tyčí. Modifikace litiny byla prováděna výše uvedeným postupem in mould pomocí předslitiny FeSiMg bez KVZ. Po vyhodnocení bodlin byla každá tyč rozřezána ve střední části tyče a byl proveden metalografický výbrus a hodnocení struktury na tvar grafitu. Před modifikací byl z pánve odebrán vzorek pro stanovení chemického složení a z výřezu odlitku konečná chemická analýza.

Výsledky konečné analýzy relevantních chemických prvků důležitých pro modifikaci (S, Mg) jsou uvedeny v tab. 1.

5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Pro predikci a hodnocení struktury a podílu červíkovitého grafitu existují různé vztahy. V této práci byl ověřován vztah Hrusovského a Wallace [7], kteří definovali nutný přebytek síry ΔS v kovu pro vznik litiny s červíkovitým grafitem:

$$\Delta S = \%S - 0,34 (\%KVZ) - 1,34 (\%Mg) \quad (3)$$

ve kterém $\%S$, $\%KVZ$ a $\%Mg$ jsou konečné obsahy těchto prvků v kovu.

Hrusovsky [7] uvádí potřebnou hodnotu přebytku síry pro vznik struktury s červíkovitým grafitem (podíl zrnitého grafitu ve struktuře musí být menší než 20%) $\Delta S = -150$ až -335 ppm. Pro strukturu se 100 % výskytem zrnitého grafitu je potřeba $\Delta S \leq -320$ ppm, přičemž hranice pro lupínkový grafit $\Delta S \geq -0,0155$,

Z konečných chemických analýz 25 odlitků z tab. 1 byl vypočten přebytek ΔS s výslednou hodnotou aritmetického průměru $\Delta S = -222,1$ ppm a směrodatnou odchylkou $-74,8$ ppm. Výsledky statistických charakteristik souboru přebytku síry jsou v tab. 1. Pomocí takto vypočtené hodnoty ΔS se pak podle stejných autorů může vypočíst podíl obsahu červíkovitého (verimikulárního VG) grafitu v litině:

$$\%VG = 278,31 - 8617,55 \Delta S \quad (4)$$

Pro jednotlivé hodnoty ΔS z tab. 1 byly podle rovnice (4) vypočteny procentuální obsahy červíkovitého grafitu v litině. Jejich hodnoty uvádí rovněž tab. 1 v posledním sloupci. Při výpočtu statistických charakteristik $\%VG$ však bylo ze souboru odstraněno 5 odlehlých hodnot. Základní statistické údaje shrnuje **tab. 2**. V **tab. 1** - jsou uvedeny obsahy Ti a Al, které byly přidávány do litiny za účelem zkoumání vlivu těchto prvků na výskyt povrchových vad odlitků-bodlin. Tyto prvky totiž současně podstatně omezují modifikační účinek Mg a ovlivňují pracovní oblast ΔS . Statistické charakteristiky souboru těchto prvků z konečných analýz tyčí přináší **tab. 2**. Podle Hrusovského [7] obsah Ti $> 0,1$ % posouvá ΔS k hranici -155 až -420 ppm. Obsah Al $> 0,33$ % rozšiřuje oblast ΔS na $-0,006$ do $-0,0350$. Kombinací 0,2 až 0,3 % Al a 0,05 až 0,1 % Ti se rozšiřuje pracovní oblast ΔS na $-0,0115$ až $-0,055$ ppm. Tyto výsledky byly potvrzeny i u našich odlitků.

6 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Aritmetický průměr procentuálního obsahu grafitu ($\%VG$) vychází 89,6%, což odpovídá skutečnosti. Ukázalo se, že zvýšené obsahy Al+Ti u některých taveb podpořily vznik červíkovitého grafitu, i když obsahy S a Mg nesplňovaly podmínku záporného ΔS . Jak bylo naznačeno výše lze předpokládat, že Al ovlivňuje růst grafitu odměšováním na rozhraní grafit-tavenina.

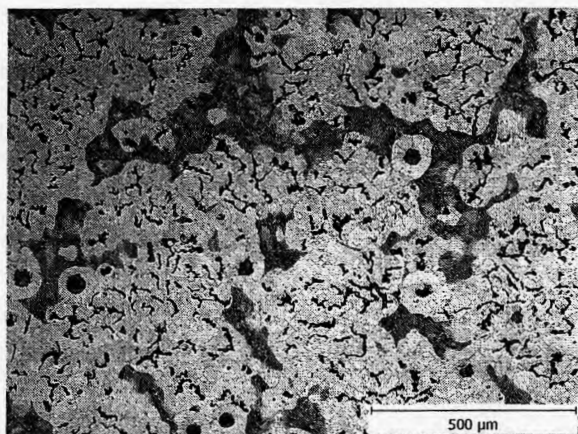
Také u Ti bylo zjištěno, že odměšuje na rozhraní, ale může ovlivnit růst grafitu odstraněním N_2 rozpuštěného v tavenině Hrusovsky [7] vysvětluje vliv Al a Ti na rozšíření pásma ΔS tím, že oba prvky mají velký sklon nejen k tvorbě oxidů, ale i nirtidů, které podporují tvorbu dendritů austenitu tak, že zvyšují eutektické přechlazení, které je nutné pro krystalizaci červíkovitého grafitu v téměř stejné výši jako u zrnitého grafitu. Je také možné, že nitridy se stávají přímo zárodky nukleace. Oba prvky silně dezoxidují taveninu a zvyšují využití Mg k odsíření litiny. Fotografie dokumentující mikrostruktury litiny s červíkovitým grafitem jsou na obr. 2 a 3.

Tab. 1 - Vybrané chemické prvky a ukazatele taveb GJV

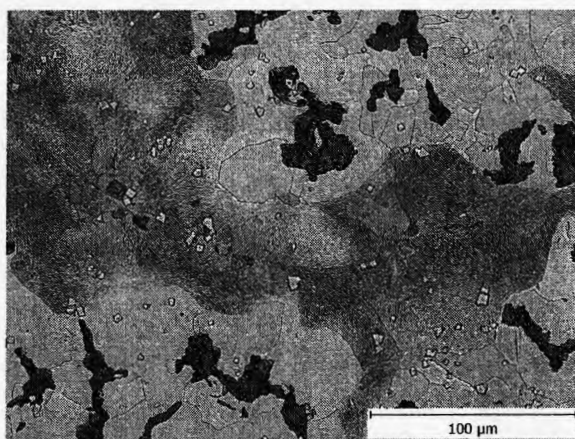
Číslo vzorku	Obsah S (%)	Obsah Mg (%)	ΔS (%)	Obsah Al (%)	Obsah Ti (%)	VG (%)
48/1	0,005	0,020	-0,0216	0,019	0,635	92
48/2	0,006	0,018	-0,0179	0,009	0,635	124
50/1	0,006	0,020	-0,0206	0,039	0,475	101
50/2	0,006	0,020	-0,0206	0,034	0,475	101
53/1	0,009	0,032	-0,0336	0,010	0,016	-11
53/2	0,009	0,028	-0,0282	0,009	-	35
54/1	0,009	0,025	-0,0243	0,008	0,008	69
61/1	0,007	0,032	-0,0356	0,010	0,005	- 28
62/1	0,009	0,021	-0,0189	0,021	0,006	115
62/2	0,009	0,026	-0,0256	0,010	0,005	58
63/1	0,009	0,028	-0,0282	0,052	0,006	35
63/2	0,007	0,023	-0,0235	0,053	0,006	75
64/1	0,007	0,025	-0,0262	0,225	0,006	52
64/2	0,009	0,021	-0,0189	0,250	0,006	115
65/1	0,007	0,023	-0,0236	0,190	0,006	75
66/1	0,008	0,028	-0,0292	0,210	0,006	26
66/2	0,009	0,022	-0,0203	0,200	0,006	104
66/3	0,008	0,022	-0,0213	0,195	0,007	95
67/1	0,010	0,027	-0,0259	0,198	0,001	55
67/2	0,009	0,030	-0,0309	0,190	0,011	12
68/1	0,018	0,015	-0,0020	0,054	0,005	262
68/2	0,019	0,024	-0,0129	0,054	0,006	167
69/1	0,018	0,030	-0,0219	0,056	0,240	90
69/2	0,018	0,025	-0,0153	0,056	0,250	147
70/1	0,009	0,013	-0,0083	0,067	0,580	207

Tab. 2 - Základní statistické charakteristiky zkoumaných prvků a vypočtených ukazatelů červíkovitého grafitu

Chemické složení	Počet hodnot	Minimální hodnota x_{\min}	Maximální hodnota x_{\max}	Aritmetický průměr \bar{x}	Medián $\approx \bar{x}$	Směrodatná odchylka s	Variační koeficient V (%)
S (%)	25	0,005	0,019	0,0101	0,009	0,004	42,3
Mg (%)	25	0,013	0,032	0,024	0,024	0,005	20,5
ΔS (ppm)	25	-355,6	-19,5	-222,1	-219	74,8	33,7
CG (%)	20	26	167	91	89,6	37	43
Ti (%)	24	0,005	0,635	0,142	0,007	0,231	162,7
Al (%)	25	0,008	0,250	0,089	0,054	0,086	96,4



Obr. 2 – Tavba 48 /2 GJV, grafit III G, P 20%, částice TiC zv. 100x, leptáno.



Obr. 3 – Tavba 48/1, GJV, grafit III G, částice TiC, zv.500x, leptáno.

Pro výrobu litiny s červíkovitým grafitem byly v minulosti využívány modifikátory na bázi hořčíku a titanu (FeSi Mg-Ti), přičemž se využívalo skutečnosti, že titan má výrazný antiglobulizační účinek na krystalizaci zrnitého grafitu v taveninách zpracovávaných hořčíkovými předslutinami. Deglobulizační působení titanu i mechanismus, kterým je krystalizace grafitického zrna potlačena a nahrazena krystalizací červíkovitého stále není dostatečně objasněn.

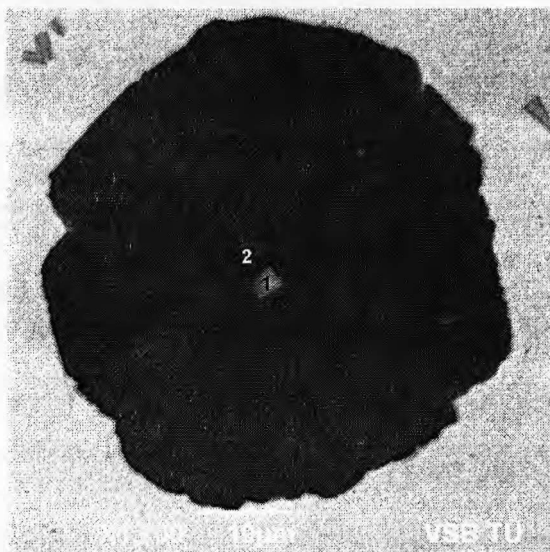
Metalografický rozbor tavby 48/2 i 48/1 s vysokým obsahem titanu (obr. 2 a 3) prokázal značný výskyt kubických útvarů karbidů titanu (TiC), rozložených na hranicích eutektických buněk i v okolí částic červíkovitého grafitu ve feriticko-perlitické základní kovové hmotě. Hodnocení tvaru grafitu bylo provedeno podle Skočovského [10]. Kubické útvary karbidu titanu byly identifikovány i v centru zrn grafitu, které se ojediněle vyskytovaly v litině s červíkovitým grafitem společně s částicemi s obsahy Fe-O (obr. 4 a tab. 3). Podobný výskyt útvarů TiC i Fe-O byl pozorován u téže tavby v částicích červíkovitého grafitu (obr. 5 a tab. 4). Z těchto analýz je možné usoudit, že titan, hliník a kyslík spolupůsobí v určitých koncentracích při vzniku zárodků pro krystalizaci zrnitého i červíkovitého grafitu.

Tab. 3 – Chemické složení vměstků v zrnitém grafitu.

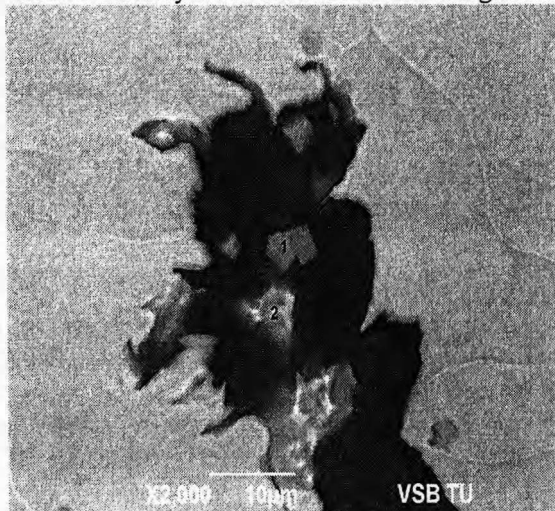
T./ (%)	C	O	Al	Si	S	Ti	Fe
48/2-1	42.7	18.8	0.8	0.4	0.3	35	2.4
48/2-2	59.0	27.1	2.8	0.5	-	1.5	9.1

Tab. 4 – Chemické složení vměstků v červíkovitém grafitu

T./ (%)	O	Mg	Al	Si	S	Ti	Fe
48/1-1	29.2	-	-	-	0.7	67.3	2.8
48/1-2	26.1	11.0	1.2	1.6	-	-	60.1



Obr. 4 – Útvary TiC a Fe-O ve středu zrna grafitu



Obr. 5 – TiC a Fe-O v částici červíkovitém grafitu

7 ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na zkoumání vzniku bodlin u odlitků vyrobených z litiny s červíkovitým grafitem při odlévání do syrových forem a současně byl hodnocen tvar grafitu v odlitcích. Bylo zjištěno, že u GJV při obsahu Al nad 200 ppm existuje silná pravděpodobnost vzniku bodlin a to prakticky bez ohledu na vlhkost formovací směsi. Současně bylo konstatováno, že množství bodlin na odlitcích při modifikaci litiny ve formě je významně nižší, než při modifikaci v pánvi. Titan, který by měl podle některých prací omezit působení hliníku a tím i vznik bodlin se při vyšších koncentracích jevil spíše opačným účinkem.

Názory na mechanismus krystalizace červíkovitého tvaru grafitu se podle různých autorů liší. V současnosti je přijímaná teorie vzniku červíkovitého grafitu, kdy červíkovitý grafit krystalizuje přeměnou (degradací) zrnitého grafitu na tvar červíkovitý. Co se týká struktury odlitků, bylo prokázáno, že oba prvky také působí na nukleaci a morfologii grafitu a pozitivně ovlivňují tvorbu červíkovitého grafitu při modifikaci litiny hořčíkovými předslutinami. Bylo ověřeno kritérium „přebytku síry“ ΔS pro posouzení tvaru červíkovitého grafitu. Úroveň ΔS , která by mohla vést k tvorbě zrnitého grafitu je omezena přítomností Al a Ti a jejich mezidendritickou segregací. Tím se omezuje růst grafitu a výsledkem je červíkovitý grafit. Z práce tedy vyplývá, že přítomnost hliníku a titanu v odlitcích vyrobených do syrových bentonitových forem může způsobit vznik nežádoucích povrchových vad – bodlin. Naopak z hlediska metalurgie výroby litiny s červíkovitým grafitem působí oba prvky Al i Ti příznivě a zejména při vyšších výchozích obsazích síry ve výchozí tavenině, před zpracováním Mg, mohou znamenat jistotu dosažení dokonalého tvaru červíkovitého grafitu, tj. s maximálním množstvím zrnitého grafitu do 20 %. Použití Ti má však i další omezení, zejména ve slévárnách, které současně vyrábí oba druhy litin. Litiny s červíkovitým i zrnitým grafitem s vyššími obsahy Al však mají zvýšený sklon ke stahování, tvorbě oxidických plen a endogenních bublin, což bylo rovněž pozorováno na experimentálních odlitcích vyhodnocovaných v této práci.[5].

8 LITERATURA

- [1] MAMPAEY, F.: et al. The use of oxygen activity measurements to determine compacted graphite structure. 2008 Keith Millis Symposium of Ductile Cast Iron. AFS, 2008, pp. 116-127.
- [2] DAWSON, S.: Compacted graphite cast iron. Hommes & Fobderie, no 388, octobre 2008, s. 11-24.
- [3] NOVÁ, I., KOSEK, P.: Výroba tenkostěnných odlitků z litiny s červíkovitým grafitem. Slévárství, roč. LVI, No 11/12 2008, pp. 492-496.
- [4] ELBEL, T., HAMPL, J.: Effect of Chemical Composition upon pinholes formation in Compacted graphite cast iron. In proceedings of 48th Foundry International Conference, Portorož, 2008, p. 53 – 54. ISSN 1318-9123.
- [5] HAMPL, J., ELBEL, T.: Hliníkv litinách. Technological Engineering, 2008, roč. 5, č. 2, s. 28 – 31. ISSN 1336-5967.
- [6] KATZ, S.: New Theory for Aluminium-Induced Gas Defects in Iron Castings and Potential Solutions. AFS Transactions, vol. 114, 2006, pp. 775 – 782
- [7] HRUSOVSKY, J. P.: WALLACE, J.F. : Effect of composition on solidification on compacted graphite iron. AFS Transactions. Vol 93, 1985, s.55-86.
- [8] GEDEONOVÁ, Z., JELČ, I.: Metalurgia liatin. Vydala HF TU v Košiciach, Košice 2000.
- [9] STEFANESCU, D. M.: Science and Engineering of Casting Solidification. , Kluwer Academic/Olenum Publishers, New York, 2002.
- [10] SKOČOVSKÝ, P., VAŠKO, A.: Kvantitatívne hodnotenie štruktúry liatin, Vysokoškolská učebnice, EDIS ŽU Žilina, 2007, ISBN 978-80-8070-748-4, pp. 63-70.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce vznikla za finanční podpory Grantové agentury České republiky v rámci projektu č. 106/08/0789.